

формулы (3) к выражению (4). В этом случае коэффициент самопоглощения шарового источника имеет вид

$$f\left(\mu_s R, \frac{b}{R}\right) = \frac{\Phi_1}{\Phi_2}, \quad (5)$$

где Φ_1 — формула (3), а Φ_2 — формула (4) при $\mu = \mu_s$.

Плотность потока от шарового самопоглощающего источника без защиты в точке P (см. рис. 1) определяется выражением

$$\Phi_0 = f\left(\mu_s R, \frac{b}{R}\right) \Phi_3, \quad (6)$$

где $\Phi_3 = \frac{S_0}{2b} \left[2bR + (b^2 - R^2) \ln \frac{b-R}{b+R} \right]$ — общеизвестное

выражение [3]. Плотность потока от шарового источника с учетом самопоглощения за сферической защитой в точке P (см. рис. 2) определяется как

$$\Phi_4 = f\left(\mu_s R, \frac{b}{R}\right) \Phi_2. \quad (7)$$

Полученные выражения являются строгим аналитическим выражением задачи об излучении самопоглощающего шарового источника для случая $\frac{b}{R} \geq 1$.

Поступило в Редакцию 22/XI 1973 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бергельсон Б. Р., Зориков Г. А. Справочник по защите от излучения протяженных источников. М., Атомиздат, 1965.
2. Попов В. И. В сб.: Приборы и методы анализа излучений. М., Атомиздат, 1960, с. 7.
3. Кимель Л. Р., Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений. М., Атомиздат, 1972.
4. Коржов Л. Н. В сб.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 13. М., Атомиздат, 1973, с. 127.

Зависимость альbedo от поляризации быстрых нейтронов, возникающей при рассеянии на ядрах отражателя

ВАНЬКОВ А. А., ВОРОПАЕВ А. И., ЦИБУЛЯ А. М.

УДК 539.171.4

Влияние поляризации нейтронов, возникающей за счет спин-орбитального взаимодействия в процессе упругого рассеяния, на диффузионные характеристики сред рассматривалось в работах [1—4]. В настоящей работе исследуется зависимость альbedo для тонкого отражателя от поляризации. Этот эффект представляет интерес с точки зрения его использования в быстром реакторе, поскольку реактивность реактора зависит от величины альbedo. Влияние поляризации может быть «разрушено» включением сильного магнитного поля, пронизывающего отражатель*. Отсюда следует принципиальная возможность создания очень коротких импульсов положительной реактивности, т. е. возможность создания импульсного быстрого реактора, управляемого переменным магнитным полем [5]. Такой реактор в качестве импульсного источника нейтронов мог бы конкурировать с другими типами импульсных источников по параметру Q/τ^2 (Q — мощность источника, τ — длительность импульса). Однако для практической реализации этой идеи желательно, чтобы влияние поляризации на реактивность не было мало по сравнению с величиной l/τ (l — время жизни нейтронов в реакторе).

В настоящей работе проведены простые оценки влияния поляризации на альbedo и соответственно на реактивность при следующих предположениях: 1) отражателем является чистый рассеиватель в форме цилиндра произвольного радиуса (рис. 1), но малой толщины a по сравнению со средней длиной пробега; нейтроны падают на отражатель вдоль оси цилиндра; 2) рассматриваются результаты процессов одно- и двухкратного упругого рассеяния. При этом пренебрегается корреляцией между углом рассеяния и потерей энергии,

Упругий сброс характеризуется средней потерей энергии.

Поскольку вероятность отражения после первого рассеяния не зависит от рассматриваемой поляризации, а члены, соответствующие кратности рассеяния больше двух, дают малый вклад в эффект вследствие малой толщины отражателя, влияние поляризации в основном заключено в компоненте альbedo, связанного с вероятностью для нейтрона испытать двойное рассеяние и вылететь наружу через заданную поверхность отражателя. Дифференциал dP этой вероятности записывается в виде

$$dP(x_1, x_2, \Omega_1, \Omega_2) = \exp(-\Sigma_1 x_1) \Sigma_1 dx_1 \times$$

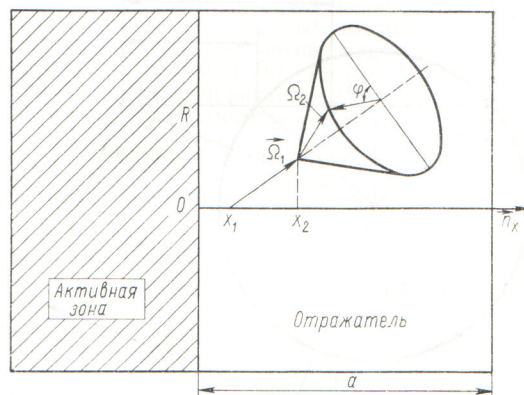


Рис. 1. Схема двухкратного рассеяния нейтронов в отражателе.

* Имеется в виду возникновение прецессии вектора магнитного момента и связанного с ним спина нейтрона.

$$\times f_1(\mu_1) d\mu_1 \exp\left[-\frac{\Sigma_2(x_2-x_1)}{\mu_1}\right] f_2(\mu_2) \frac{1}{\pi} \times \quad (1)$$

$$\times [1 + P_1(\mu_1) P_2(\mu_2) \cos \varphi] \times d\mu_2, d\varphi,$$

что соответствует произведению вероятностей испытать первое рассеяние в точке x_1 в направлении Ω_1 , второе — при $x = x_2$ в направлении $\Omega_2(\mu_2, \varphi)$ и вылететь наружу при условии $(\Omega_2 \mathbf{n}_x) < 0$. Единичный вектор \mathbf{n}_x совпадает с направлением падающих нейтронов (см. рис. 1).

Используются следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= (\mathbf{n}_x \Omega_1), \\ \mu_2 &= (\Omega_1 \Omega_2), \\ \mu_3 &= (\Omega_2 \mathbf{n}_x), \end{aligned} \quad (2)$$

$\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$ — макроскопические сечения взаимодействия при энергиях падающего нейтрона и после первого и второго рассеяний; $f_1(\mu_1), f_2(\mu_2)$ — индикатриссы первого и второго рассеяний; $P_1(\mu_1), P_2(\mu_2)$ — коэффициенты поляризации, соответствующие акту двойного рассеяния.

Дифференциальное сечение упругого рассеяния нейтронов, испытавших первое рассеяние, выражается в виде (см., например, [6])

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 [1 + P_1(\mu_1) P_2(\mu_2) \cos \varphi], \quad (3)$$

где $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0$ — дифференциальное сечение рассеяния падающих нейтронов.

Очевидно, влияние поляризации на альbedo $\Delta\beta_2$ в рассматриваемой схеме двукратного рассеяния определяется слагаемым выражением (1), содержащим коэффициенты поляризации:

$$\begin{aligned} \Delta\beta_2 &= \int_{x_1, x_2, \Omega_1, \Omega_2} \exp(-\Sigma_1 x_1) \Sigma_1 dx_1 f_1(\mu_1) d\mu_1 \times \\ &\times \exp\left[-\frac{\Sigma_2(x_2-x_1)}{\mu_1}\right] \frac{\Sigma_2}{\mu_1} dx_2 \times \\ &\times \frac{1}{\pi} f_2(\mu_2) d\mu_2 P_1(\mu_1) P_2(\mu_2) \cos \varphi d\varphi. \end{aligned} \quad (4)$$

В случае плоского слоя (радиус цилиндра бесконечен) выражения (1) и (4) можно проинтегрировать по переменным x_1 и x_2 с использованием геометрического соотношения для исключения угловой переменной φ :

$$\mu_3 = \mu_1 \mu_2 - \cos \varphi \sqrt{(1-\mu_1^2)(1-\mu_2^2)}, \quad (5)$$

при этом функции $f(\mu)$ и $f(\mu)P(\mu)$ выражаются в таком виде, в котором обычно представляются соответствующие экспериментальные данные:

$$f(\mu) = a_0 + a_1\mu + a_2\mu^2; \quad (6)$$

$$f(\mu)P(\mu) = \sqrt{(1-\mu^2)}(c_0 + c_1\mu).$$

Для получения окончательного результата необходимо провести численное интегрирование по μ_1 и μ_3 . В случае цилиндра конечного радиуса оценку интеграла с соответствующими ограничениями области интегрирования легко получить известным способом статистических испытаний для вычисления определенных интегралов.

Для оценки реактивности $\Delta k/k$, возникающей при изменении альbedo $\Delta\beta$, воспользуемся соотношением, получаемым в предположении, что поток и ценность

нейтронов в активной зоне реактора постоянны. Для реакторов предельно малых размеров такое предположение не приведет к большим ошибкам.

Если w — вероятность вылета нейтрона из активной зоны, ν — среднее число нейтронов на акт деления и p — вероятность поглощения в активной зоне, то коэффициент размножения

$$k = \nu(1-w) + wvc, \quad (7)$$

где c — вероятность поглощения вылетевшего из активной зоны нейтрона; она определяется соотношением

$$c = \beta p + \beta(1-p), \quad (8)$$

т. е.

$$c = \frac{\beta p}{1-\beta(1-p)}, \quad (9)$$

откуда

$$k = \nu \left[1 - w \left(1 - \frac{\beta p}{1-\beta(1-p)} \right) \right] \approx \nu [1 - w(1-p\beta)] \quad (10)$$

при $\beta \ll 1$,

тогда $\Delta k = \nu w p \Delta\beta$. Величины w и p можно приближенно выразить через ν и β . Нетрудно показать, что для реакторов из ^{235}U и ^{239}Pu имеет место приближенное соотношение:

$$\frac{\Delta k}{k} \approx A \Delta\beta,$$

где коэффициент $A \approx 0,7 \div 0,8$.

В качестве вещества отражателя был выбран жидкий гелий, поскольку коэффициенты поляризации для ядер гелия в довольно широкой энергетической области около резонанса при энергии 1,15 Мэв велики. На рис. 2 представлены расчетные зависимости величины эффекта $\Delta\beta_2$ от начальной энергии нейтронов E_n для плоского слоя и цилиндра радиусом $a = 10$ см и для нескольких толщин отражателя. Исходные ядерно-физические данные для гелия были взяты из работы [7].

Если принять толщину и радиус отражателя из жидкого гелия равными 10 см, то можно оценить влияние поляризации усредненной по спектру нейтронов быстрого реактора (близкому к спектру деления), на

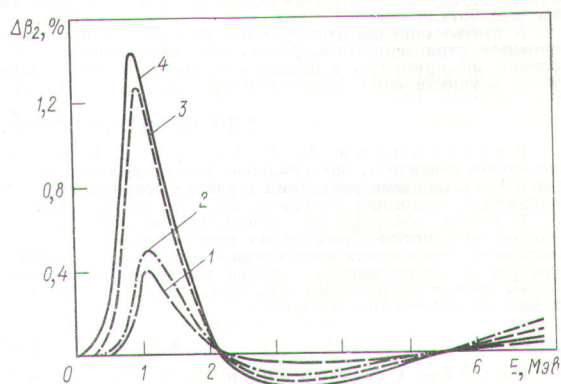


Рис. 2. Зависимость парциального эффекта $\Delta\beta_2$ поляризации в величине альbedo от начальной энергии нейтронов для отражателя из жидкого гелия при различных величинах R и a :

1 — $R = \infty, a = 5$ см; 2 — $R = 10$ см, $a = 20$ см; 3 — $R = \infty, a = 20$ см; 4 — $R = \infty, a = 100$ см.

альbedo и реактивность; они равны приблизительно 0,0012 и $9 \cdot 10^{-4}$ соответственно.

Необходимо учитывать, что система отражателя с магнитом реально может охватить лишь часть (например, 1/6) полного телесного угла; кроме того, конечность величины магнитного поля дает дополнительный «коэффициент использования» 0,6—0,7, так что указанные выше величины оценок $\Delta\beta$ и $\Delta k/k$ следует уменьшать на порядок.

Для тяжелых элементов коэффициенты поляризации невелики, но вместе с тем благоприятным фактом является слабая энергетическая зависимость коэффициентов разложения в формулах (6). Проведенные в настоящей работе расчеты показали, что для отражателя из ниобия (по исходным данным [8]) влияние поляризации на альbedo и реактивность в восемь — десять раз меньше, чем для гелиевого отражателя (при прочих равных условиях). Можно надеяться на экспериментальное обнаружение влияния поляризации на реактивность.

Боковые эффекты в таких измерениях составляют $\frac{\Delta k}{k} \sim 10^{-6}$; эта цифра получена экспериментально группой сотрудников с участием авторов при работе

с магнитной системой, расположенной вблизи активной зоны реактора БР-1.

Авторы выражают благодарность В. В. Орлову за существенную помощь в работе и ценные замечания.

Поступило в Редакцию 24/XII 1973 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bell G., Goad B. Nucl. Sci. and Engng, 1965, v. 23, p. 380.
2. Goldsmith M. Nucl. Sci. and Engng, 1966, v. 25, p. 242.
3. Казаченков Ю. Н., Орлов В. В. В сб.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 4. М., Атомиздат, 1965, с. 58.
4. Казаченков Ю. Н., Орлов В. В. «Атомная энергия», 1965, т. 18, вып. 2, с. 179.
5. Казаченков Ю. Н. «Ядерная физика», 1965, т. 1, с. 763.
6. Файснер Г. Поляризация нуклонов при рассеянии. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
7. Morgan J., Walter R. Phys. Rev., 1968, v. 168, p. 1114.
8. Lane A. e.a. Phys. Rev., 1964, v. 80B, p. 133.

Рефераты статей, опубликованных в настоящем выпуске

УДК 621.311.2:621.039

Александров А. П., Булкин Ю. М., Дмитриев И. Д., Доллежал Н. А., Емельянов И. Я., Еперин А. П., Епифанов А. Ф., Константинов Л. В., Крамеров А. Я., Кубронко А. А., Кузнецов С. П., Кулов Е. В., Кунегин Е. П., Мешков А. Г., Полушкин К. К., Рябов В. И., Сироткин А. П., Фейнберг С. М. **Физический и энергетический пуск первого блока Ленинградской АЭС им. В. И. Ленина.** — «Атомная энергия», 1974, т. 37, с. 99.

После завершения пуско-наладочных работ и подготовки необходимого оборудования в период с 14 ноября по 21 декабря 1973 г. осуществлен энергетический пуск АЭС. К маю 1974 г. она выработала более 1 млрд. кВт·ч электроэнергии.

В статье описана конструкция реактора и приведены его основные характеристики. Изложена последовательность проведения экспериментов в процессе физического пуска. Описаны этапы осуществления энергетического пуска ЛАЭС. (5 рис.)

УДК 621.311.2:621.039.33.003.1

Белостоцкий А. М., Быков А. И. **Сравнительная оценка денежных, материальных и трудовых затрат на атомные и тепловые электростанции с учетом предприятий топливоснабжения.** — «Атомная энергия», 1974, т. 37, с. 108.

В статье обсуждаются экономические аспекты развития ядерной энергетики с различных точек зрения. Показано, как изменяются требования энергетики к народному хозяйству при переходе с органического топлива на ядерное горючее. Дан анализ причин удорожания АЭС по сравнению с ТЭС. (2 табл., 19 библиографических ссылок.)

УДК 621.039.003:001.57

Вирцер А. Д., Корякин Ю. И., Локшин В. Л., Чернавский С. Я. **Математическая модель оптимизации системы топливоснабжения развивающейся ядерной энергетики.** — «Атомная энергия», 1974, т. 37, с. 113.

В статье изложены исходные принципы, принятые при создании математической модели системы топливоснабжения развивающейся ядерной энергетики. Дано описание самой мате-

матической модели, которая позволяет оптимизировать сроки ввода и мощность предприятий внешнего топливного цикла, а также их загрузки с учетом зависимости капиталовложений и издержек производства от мощности предприятий. (2 рис., 8 библиографических ссылок.)

УДК 621.039.562:621.039.512.45

Емельянов И. Я., Филипчук Е. В., Потепенко П. Т., Небоин В. Т. **Инженерные проблемы регулирования неустойчивого распределения мощности ядерного реактора.** — «Атомная энергия», 1974, т. 37, с. 118.

Рассматриваются технические аспекты построения системы автоматического регулирования неустойчивого распределения мощности в реакторе. Неустойчивость обусловлена положительным коэффициентом реактивности. Для обеспечения контроля и регулирования активная зона реактора разбивается на несколько ячеек, каждая из которых имеет датчик потока нейтронов. В таких ячейках содержится одинаковое число стержней, движущихся в процессе работы синхронно.

В основу математической модели реактора положено одногрупповое диффузионное приближение; задача решается методом аналогового моделирования. Приведена электрическая схема модели и расчетные соотношения для параметров модели. Обсуждаются проблемы и результаты анализа релейных систем регулирования радиального распределения мощности. (4 рис., 4 библиографических ссылки.)

УДК 621.039.526:621.039.512.45

Усынин Г. Б., Чирков В. К. **О стабильности и выравнивании поля тепловыделения в быстром реакторе.** — «Атомная энергия», 1974, т. 37, с. 123.

Описан способ исследования поля тепловыделения и его поведения во времени с помощью вычислительных экспериментов в определенных точках факторного пространства. Приведены результаты расчетов коэффициента разбавления теплоносителя в двухзонном быстром реакторе. Обсуждается зависимость этих коэффициентов от различных факторов. (3 рис., 2 табл., 6 библиографических ссылок.)

(Продолжение см. на с. 182)